

全球非静力学モデルを用いた高解像度計算による気象擾乱の発生・発達メカニズムとその予測可能性に関する研究

課題責任者

那須野 智江 海洋研究開発機構 地球環境部門 環境変動予測研究センター

著者

山田 洋平^{*1}

^{*1} 海洋研究開発機構 地球環境部門 環境変動予測研究センター

キーワード：全球非静力学モデル，台風，アンサンブル数値実験，初期摂動，台風進路

1. はじめに

本課題では，全球非静力学大気モデル Nonhydrostatic ICosahedral Atmospheric Model (NICAM; Satoh et al. 2014[1]; JAMSTEC および連携研究機関において共同開発)の高度化およびこれを用いた数値実験を行うことにより，雲に関する気候再現性を向上させるとともに，台風等の気象擾乱の発生・発達のメカニズムを明らかにし，それらの予測に関する知見を拡充することを目的とする．NICAMの特色は，雲・降水に関する物理プロセスを詳細に計算する点である．上記目的を達成するために，本課題では雲の微物理過程の精緻化を重点的に行い (Seiki and Ohno 2023[2]; Seiki and Nagao 2024[3])，台風等の極端現象の季節スケール・気候予測に必須となる，高解像度大気海洋結合モデルの開発・系統的な大アンサンブル数値実験を行っている．また，高解像度全球モデルの利点を活かした台風と環境場の相互作用に関する研究も実施している．特定事例のアンサンブル予測においては，適切な初期値の作成が極めて重要である．R6 年度には，台風の経路に注目した初期摂動の作成手法を新たに考案した．その概要について，以下に報告する．

2. アンサンブル数値実験の初期化手法の開発

台風は環境場と相互作用をしており，観測データから「台風が環境場に与える影響」を定量的に評価するのは困難である．数値実験を用いることによって人為的に台風を除去あるいは台風の強度を変化させれば，「台風が環境場に与える影響」を定量的に評価することが可能になると期待できる．一方で数値モデルや初期値には不完全性があり，数値実験の結果には不確実性が内在する．アンサンブルを用いて不確実性も考慮して影響を評価する必要がある．多くの台風のアンサンブル実験では台風の進路はアンサンブルメンバー間で大きく変動する (例えば Yamada et al. 2023[4])．そこで，本研究では台風の進路に大きな差ができないアンサンブル数値実験の初期値の開発を実施した．

ここでは Toth and Kalney (1993[5], 1997[6])による Breeding of growing modes (BGM) 法を参考にした．BGM法では，アンサンブル実験におけるメンバー間の予測誤差を算出し，リスケールファクターで誤差の大きさを調

節して摂動を決定する．摂動を与えた初期値は以下のよう記述される．

$$F_{MEM}^* = F_{ctl} + \alpha(F_{MEM} - F_{ctl}) \quad (1)$$

ここで， F_{MEM} と F_{MEM}^* は任意のアンサンブルメンバー (MEM) の予測値と摂動を加えた初期値， F_{ctl} は基準となるアンサンブルメンバー (CTL) の予測値， α はリスケールファクターを示す．BGM 法では式 (1) による初期値の作成を十分に反復し成長モードを育成させる． α は Total Energy 等を用いて定義される (Saito et al. 2012[7])．

$$\alpha_{TE} = TE / (TE + \delta TE) \quad (2)$$

TE は CTL の Total Energy， δTE は CTL と MEM の Total Energy の差を示す．本研究ではアンサンブルメンバー間の台風の位置の差を用いて α を以下のように定義する．以下では本手法を便宜上 TP 法と呼ぶ．

$$\alpha_{TC} = 1 - (|D|/D_0)^{1/\beta} \quad (3)$$

D は CTL と MEM の台風の位置の差， D_0 および β はパラメータであり， D_0 は 1000km とした．これは台風の位置に 1000km 以上の差があるまたは台風が存在しない場合は，そのメンバーは除外することを意味する． β は 1, 2, 4, 8 とし感度を確認した．式 (1) と (3) より，D が小さくなるにつれて F_{MEM}^* は F_{MEM} に近づくことがわかる．つまり，台風の位置が CTL と MEM で近い場合は MEM の予測結果に近づくように初期値を生成し，離れている場合は MEM の予測結果を CTL の予測結果に近づける摂動を与え，初期値を作成する．

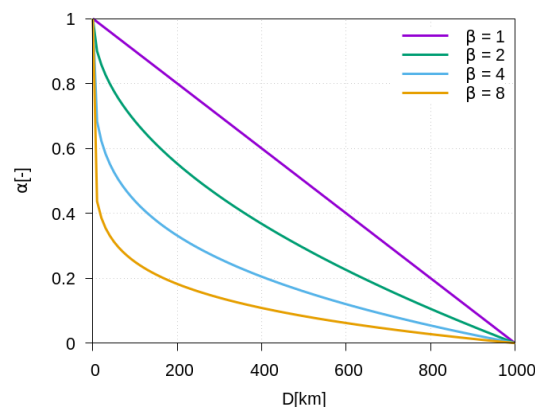


図1 リスケールファクターの β 依存性.

図1に α_{TC} の β 依存性を示す。Dが同じ距離でも β の値が大きい場合、摂動の大きさが小さくなり、 F_{MEM}^* は F_{ctl} に近づく。つまり β が大きいほど F_{ctl} に近い初期値を生成することになる。

TP法を用いた具体的な初期値の生成プロセスを紹介する。対象は令和元年東日本台風(Hagibis)とした。始めにERA5(Hersbach et al. 2020[8])を初期値に利用した、実験開始時刻の異なるアンサンブル実験を実施した。アンサンブル実験にはNICAMを利用した。水平格子間隔は14kmとし、モデルの設定はTakasuka et al. (2024[9])に概ね倣った。実験開始時刻を2019年10月1日0UTCから5日0UTCまで6時間毎にずらした17メンバーのアンサンブル実験を実施した。

17メンバーのうちHagibisの進路が現実的に表現されたのは12メンバーだった。12メンバーを利用して初期値を生成する。12メンバーの中で日本付近での進路と強度が最も観測に近いメンバーをCTLとした。次に10月5日18UTCから12日12時までの間、本手法を用いて摂動の生成と実験を6時間おきに反復し11メンバーの初期値を作成した。以下では初期値の性能を評価する。参考にTotal Energyを用いて式(2)の従来のBGM法による初期値を作成し、その性能をTP法と比較する。

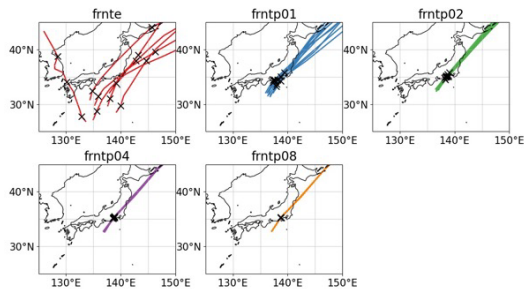


図2 Hagibisの進路の比較。frnteはBGM法、frntp01はTP法($\beta=1$)、frntp02はTP法($\beta=2$)、frntp04はTP法($\beta=4$)、frntp08はTP法($\beta=8$)を意味する。×印は毎0時のHagibisの位置を示す。

図2に各手法を用いて生成した初期値(10月12日12UTC)から開始したアンサンブル実験のHagibisの進路を示す。BGM法では台風の位置は考慮せずに初期値を作成するため、メンバー間で実験開始時の段階でHagibisの位置は異なり、進路も大きく異なっていた。また台風を検出できないアンサンブルメンバーも存在した。

台風の位置を考慮したTP法では期待通り、Hagibisは概ね似た進路をとっていた。 β が大きい場合は式(3)の定義上 F_{ctl} に近い初期値が生成されるため、メンバー間のHagibisの進路差は小さくなると期待される。実際に図2の通り、 β が大きくなるとメンバー間の位置の差は小さくなった。 β が4以上の場合はメンバー間で進路の差はほとんどなく、特に β が8の時には実験開始12時間後の10月13日0時の段階でHagibisの位置はほぼ一致していた。

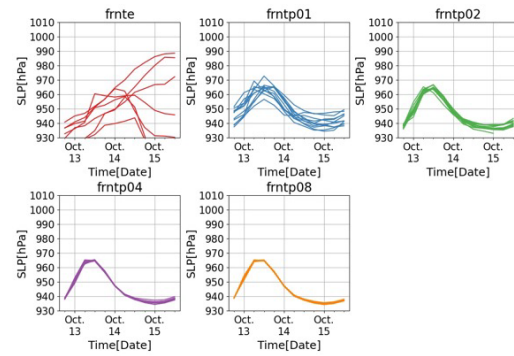


図3 Hagibisの中心気圧の時間変化の比較。frnteはBGM法、frntp01はTP法($\beta=1$)、frntp02はTP法($\beta=2$)、frntp04はTP法($\beta=4$)、frntp08はTP法($\beta=8$)を意味する。

強度に注目すると(図3)、BGM法では中心気圧の時間変化はメンバー間で大きく異なっていたが、TP法では全てのメンバーで気圧が一度上昇してから低下する様子が確認できた。 β に対する依存性も進路と同様に、 β の値に応じてメンバー間の中心気圧の差が小さくなることが確認でき、TP法は期待通りの挙動を示していた。

TP法では台風の進路がメンバー間で大きく変動しない初期値を作成することを目指している。一方で不確実性を評価するにはアンサンブルスプレッドが存在する必要がある。スプレッドの評価として、ここではTalagrandダイアグラムを用いて、アンサンブルメンバー間の環境場の予測結果のばらつきを評価する。Talagrandダイアグラムとは、1) ある地点のアンサンブル予測の各メンバーの予測値を小さい順番に並べて、2) 実況がどの予測値と予測値の間(区間)に入るかを調べ、3) 求める期間や領域内のすべての地点で区間に入った実況の度数を計測して、4) 横軸に区間の番号、縦軸に度数を総数に対する割合で示すグラフである。その解釈は、横軸両端(中央)区間の割合が大きいと実況が補足できておらずスプレッドが小さすぎる(大きすぎる)ことを意味し、一定の区間に割合が偏る場合は予測にバイアスがあることを意味する。スプレッドが適切な大きさで、バイアスが小さければ、割合が各区間に偏りなく存在し、実況の補足が良いと判断される(気象庁数値予報部 2002[10])。

ここではCTLに対するスプレッドを評価することを目的とする。NICAMの実験結果は実況に対してバイアスが存在すると考えられる。TP法ではERA5の再解析から開始した実験結果を用いるため、実況に対してバイアスが存在しCTLに対するスプレッドを評価することはできない。そこでCTLの実験結果を実況と仮定し、日本を覆う領域(110E-160W, 10N-40N)の500hPa面のジオポテンシャル高度(z500)を用いてTalagrandダイアグラムを作成した。

図4にアンサンブル実験開始から24時間後、48時間後、72時間後のTalagrandダイアグラムを示す。BGM法で

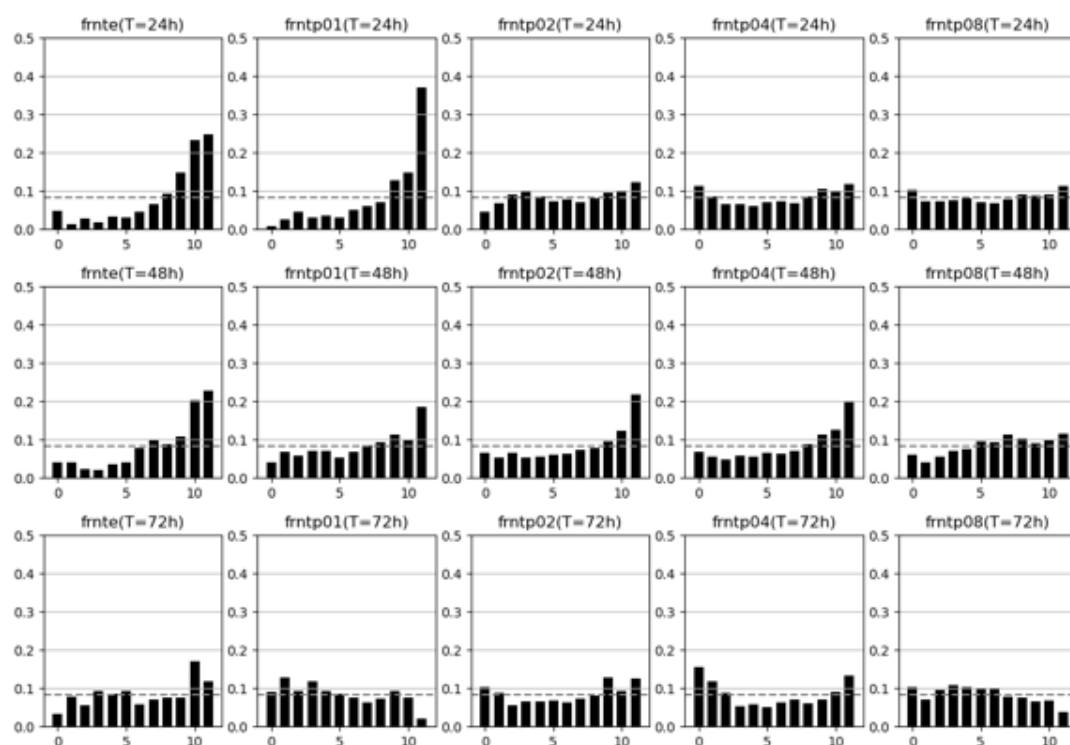


図4 500hPa面のジオポテンシャル高度のTalagrandダイアグラム。frnteはBGM法、frntp01はTP法($\beta=1$)、frntp02はTP法($\beta=2$)、frntp04はTP法($\beta=4$)、frntp08はTP法($\beta=8$)を意味する。評価領域は100E–160W, 10N–40Nとした。上段から順にアンサンブル実験開始から24時間後、48時間後、72時間後の結果を示す。横破線は理想的な割合を示す。

は横軸の右側に割合が偏った分布をしており、それが時間とともに軽減している様子がわかる。これは初期値に与えた摂動がモデルのバランスを満たしておらず、時間とともに調整されたためと考えられる。

TP法では $\beta=1$ の時に、BGM法と同様の傾向が確認できる。 $\beta=1$ の時には、台風の位置の差が同じであっても大きな摂動を加えるため、モデルのバランスを満たすことができないと考えられる。 β を2以上にした場合は実験開始から24時間後の段階では、割合が横軸一方に極端に偏った様子は確認できない。 β を2以上にした場合には加えた摂動がモデルのバランスを著しく壊していないと考えられる。48時間後に β が2と4の場合に右側に偏った割合となる、この偏りは72時間後には解消される傾向があった。この理由は現在検証中である。今回対象としたHagibisの事例では β を2以上とした場合には、従来のBGM法に比べて概ね適切なスプレッドの大きさと、CTLの補足が良い初期値をTP法で作成可能であると考えられる。

台風の予測において進路と強度は主要な要素であり、本手法では、台風経路を拘束することで、台風強度に関するアンサンブル実験が可能となった。これは台風と周辺場との相互関係の理解において有用である。今後対象事例を増やす等の詳細な評価を行い、手法の汎用性を高める必要がある。

3. 今後の展望

本課題では、雲解像モデルによる全球規模・アジア広域の雲降水過程や気候変動の理解と予測を達成するために、雲の微物理過程の精緻化を重点的に行い（R6年度にはSeiki and Nagao 2024[3]を出版）、高解像度大気海洋結合モデルの開発・大アンサンブル数値実験を実施している。R6年度には、基盤開発のための一連の数値実験に加え、国際共同研究として2024年の台風シーズンを対象とするマルチモデルアンサンブル数値実験も行った。2024年の実況は台風シーズン前の予想と大きく異なり、原因の究明が当該分野において喫緊の課題となっている（当該課題においても追加実験による調査を行い、共著論文を投稿中）。高解像度全球モデルによる全球的な雲降水現象の再現性向上およびメカニズム解明は、世界的にも開発応用が急務となっており、海洋地球環境デジタルツインの構築の一端を担うものである。今後継続して基盤となる知見の構築・各種物理過程の精緻化・実験設定に係る技術開発を進める。

謝辞

本研究は、JST ムーンショット型研究開発事業（JPMJMS2282-10）の支援を受けて行った。

文献

[1] Satoh, M., and 17 co-authors, “The Non-hydrostatic Icosahedral Atmospheric Model:

Description and Development” , Progress in Earth and Planetary Science, 1, 18. doi:10.1186/s40645-014-0018-1, (2014).

[2] Seiki, T., & Ohno, T., “Improvements of the Double-Moment Bulk Cloud Microphysics Scheme in the Nonhydrostatic Icosahedral Atmospheric Model (NICAM)”, Journal of the Atmospheric Sciences, 80(1), 111-127, (2023).

[3] Seiki, T., & Nagao, T.M., “Evaluation of the aggregation efficiency modeling at colder atmospheric temperatures in comparison to satellite observations”, Journal of the Atmospheric Sciences, 81(10), 1689-1710, (2024).

[4] Yamada, Y., and 9 co-authors, “Large ensemble simulation for investigating predictability of precursor vortices of Typhoon Faxai in 2019 with a 14-km mesh global nonhydrostatic atmospheric mode”, Geophysical Research Letters, 50(3), e2022GL100565, (2023).

[5] Toth, Z., & Kalnay, E., “Ensemble forecasting at NMC: The generation of perturbations”, Bulletin of the American Meteorological Society, 74(12), 2317-2330, (1993).

[6] Toth, Z., & Kalnay, E., “Ensemble Forecasting at NCEP and the Breeding Method”, Monthly Weather Review, 125(12), 3297-3319, (1997).

[7] Saito, K., and 3 co-authors, “Effect of lateral boundary perturbations on the breeding method and the local ensemble transform Kalman filter for mesoscale ensemble prediction”, Tellus A, 64(1), 11594, (2012).

[8] Hersbach, H., and 43 co-authors, “The ERA5 global reanalysis”, Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, 146(730), 1999-2049, (2020).

[9] Takasuka, D., and 12 co-authors, “How can we improve the seamless representation of climatological statistics and weather toward reliable global k-scale climate simulations?”, Journal of Advances in Modeling Earth Systems, 16(2), e2023MS003701, (2024).

[10] 気象庁予報部, “平成 14 年度数値予報研修テキスト「数値解析予報システムの検証と改良」(数値予報課)”, 51pp, (2002 年 10 月)